

УДК 621.382.33

ВВЕДЕНИЕ ПРИМЕСИ-ПРИСАДКИ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ СЛОЙ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ ЛЕГИРОВАНИИ

Гусев О.К., Воробей Р.И., Тьяловский К.Л., Шадурская Л.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предлагается комбинированный способ легирования эпитаксиального слоя в процессе его выращивания, заключающийся в введении дополнительной примеси. По отношению к свойствам основной примеси дополнительная примесь должна вызывать противоположное по знаку изменение периода решетки матрицы. Использование комбинированного легирования уменьшает напряжение несоответствия периодов решетки кристалла и плотность дислокаций несоответствия.

Ключевые слова: легирование, эпитаксия, примесь, период решетки, дислокация несоответствия.

INTRODUCTION OF IMPURITY INTO THE EPITAXIAL LAYER DURING SOLID-PHASE DOPING

Gusev O.K., Vorobey R.I., Tyavlovsky K.L., Shadurskaya L.I.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The proposed combined method of doping the epitaxial layer in the course of its growing consists of introduction of additional impurity during the process. As to the properties of the main impurities, an additional admixture should cause the opposite sign of change in the lattice period. The use of combined doping reduces tensions caused by non-compliance of the crystal lattice periods and the density of non-compliance dislocations.

Key words: doping, epitaxy, impurity, lattice period, non-compliance dislocation.

Адрес для переписки: Тьяловский К.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

Одной из основных задач технологии полупроводниковых приборов является легирование эпитаксиального слоя с заданной концентрацией примеси непосредственно во время его выращивания. Используемые методы легирования можно классифицировать по фазовому состоянию исходного примесного соединения: легирование из источников твердой, жидкой, газообразной фаз или молекулярно-лучевая эпитаксия [1; 2].

Если в кремний вводится примесь и атомный радиус этой примеси отличается от радиуса атомов Si, то различие атомных радиусов примеси и кристаллической матрицы приведет к появлению напряжения несоответствия:

$$\Delta\sigma = \frac{E}{1-\gamma} f; \quad f = \frac{\Delta\alpha}{\alpha},$$

где E – модуль упругости, γ – коэффициент Пуассона, f – коэффициент несоответствия периодов решетки кристалла, $\Delta\alpha = (\alpha_d - \alpha_c)$ – разность периодов решетки наращиваемого слоя и подложки [1].

В случае гомоэпитаксии основным источником напряжений несоответствия является различие в природе и концентрации подложки и наращиваемого слоя. При этом упругие постоянные эпитаксиального слоя и подложки остаются практически неизменными. Минимальные напряжения несоответствия достигаются в условиях гомогенности, когда значения несоответствия периодов решетки f не превышают величины $4 \cdot 10^{-4}$.

Одной из основных причин ухудшения параметров полупроводниковых приборов, проявляю-

щихся в снижении надежности, ухудшения шумовых параметров, уменьшения пробивных напряжений являются дислокации несоответствия [3].

Генерация дислокаций может быть снижена при использовании комбинированных процессов легирования одновременно с выращиванием эпитаксиального слоя. При этом наряду с основной легирующей примесью в эпитаксиальный слой вводится дополнительная примесь (примесь-присадка), вызывающая противоположное по знаку изменение периода решетки матрицы (рисунок 1).

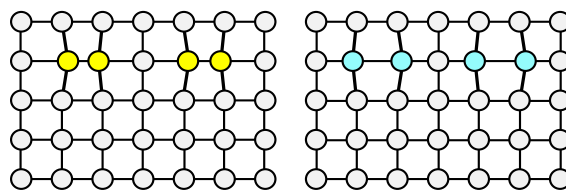


Рисунок 1 – Изменение матрицы кристаллической решетки при введении основной примеси и примеси-присадки

Так, например, если основная легирующая примесь имеет атомный радиус меньше атомного радиуса кремния (фосфор, бор), то примесь-присадка должна иметь атомный радиус больше, чем у кремния.

Условие изопериодного, т. е. не вызывающего изменения периода решетки комбинированного легирования, можно записать в виде

$$f_D N_D = f_C N_C,$$

где f_D и f_C – коэффициенты деформации основной легирующей примеси и компенсирующей примеси-присадки, а N_D , N_C – их концентрации.

При этом, компенсирующая примесь должна удовлетворять следующим основным требованиям: обладать высокой растворимостью, не образовывать химических соединений с матрицей и основной легирующей примесью, быть электрически неактивной или иметь тот же тип проводимости, что и основная легирующая примесь.

Для кремния, например, такими примесями являются изовалентные примеси IV группы: Ge, Sn, С. Германий и олово имеют тетраэдрические ковалентные радиусы больше, чем у кремния, и являются удобными компенсирующими добавками при формировании сильно легированных фосфором и бором эпитаксиальных слоев. Так как растворимость олова в кремнии невелика, то наиболее предпочтительной компенсирующей примесью при комбинированном легировании является германий.

При использовании в качестве основной легирующей примеси сурьмы, имеющей больший чем у кремния атомный радиус, в качестве компенсирующей примеси-присадки целесообразно использовать углерод. Однако его присутствие в эпитаксиальных слоях кремния не всегда желательно [1; 3].

Одним из перспективных методов для введения компенсирующих примесей-присадок в эпитаксиальные слои является метод плазменного легирования [4] из твердофазных источников, в частности, газоразрядное легирование в режиме тлеющего разряда и легирование с использованием лазерной плазмы. Требуемая плотность мощности импульсного лазерного излучения при длине волны 1064 нм составляет величину 10^3 – 10^4 Вт/см². Для улучшения однородности свойств легируемого эпитаксиального слоя может производиться пространственное сканирование мишени лазерным лучом (рисунок 2).

Отметим, что технология газоразрядного легирования из твердофазного источника с лазерной интенсификацией позволяет формировать эпитаксиальные слои с неограниченным перечнем легирующих примесей в широком диапазоне концентраций [5]. При этом контроль концентрации примеси, следовательно и профиль распределения примеси, как основной так и присадки, достигается удобными методами: изменением напряжения и тока газового разряда, интенсивностью лазерного излучения (изменением скважности лазерных импульсов).

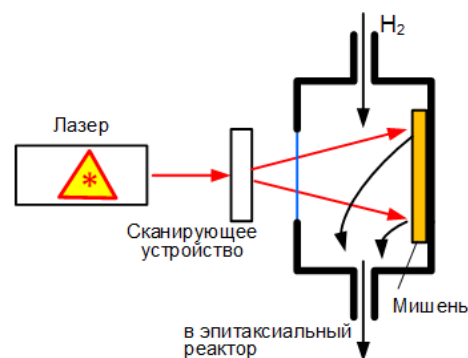


Рисунок 2 – Схема легирования с использованием лазерной плазмы

Использование комбинированного легирования уменьшает напряжение несоответствия периодов решетки кристалла и плотность дислокаций несоответствия в эпитаксиальном слое, что в итоге приводит к улучшению параметров изготавливаемых приборных структур.

Это позволяет использовать предлагаемую технологию для производства широкого спектра приборных структур с применением различных материалов, например, фотоэлектрических преобразователей [6], использующих как кремний, так и некремниевые материалы для формирования базовых приборных структур.

Литература

1. Емельянов, В.А. Эпитаксиальные слои кремния и германия для интегральных микросхем / В.А. Емельянов, А.С. Турцевич, О.Ю. Наливайко. – Минск : Интегралполиграф, 2008. – 288 с.
2. Клюева, В.А. Обзор методов нанесения кремниевых покрытий / В.А. Клюева // Молодой ученый. – 2016. – № 10 (114). – С. 236–246.
3. Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем / В.А. Пилипенко [и др.] // Технология и конструирование в производстве интегральных схем. – 2013. – № 2–3. – С. 43–57
4. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии / под общ. ред. А.П. Достанко и Н.К. Толочко. – Минск : Бестпринт, 2005. – 682 с.
5. Геттерирование эпитаксиальных структур редкоземельными элементами. / Р.И. Воробей [и др.] // Материалы 10-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2017». – Минск : БНТУ, 2017. – С. 73–74.
6. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R.I. Vorobey [et al.] // Devices and Method of Measurements. – 2021. – No 2. – P. 108–116.